

Rivelazione di Onde Gravitazionali nello spazio:

LISA

(laser interferometer space antenna)

and

LISA-Pathfinder

LISA e' un rivelatore interferometrico spaziale di Onde Gravitazionali della lunghezza di 5 milioni di Km.

Lancio: previsto nel 2012, inizio presa dati 2013

Partners: ESA – NASA

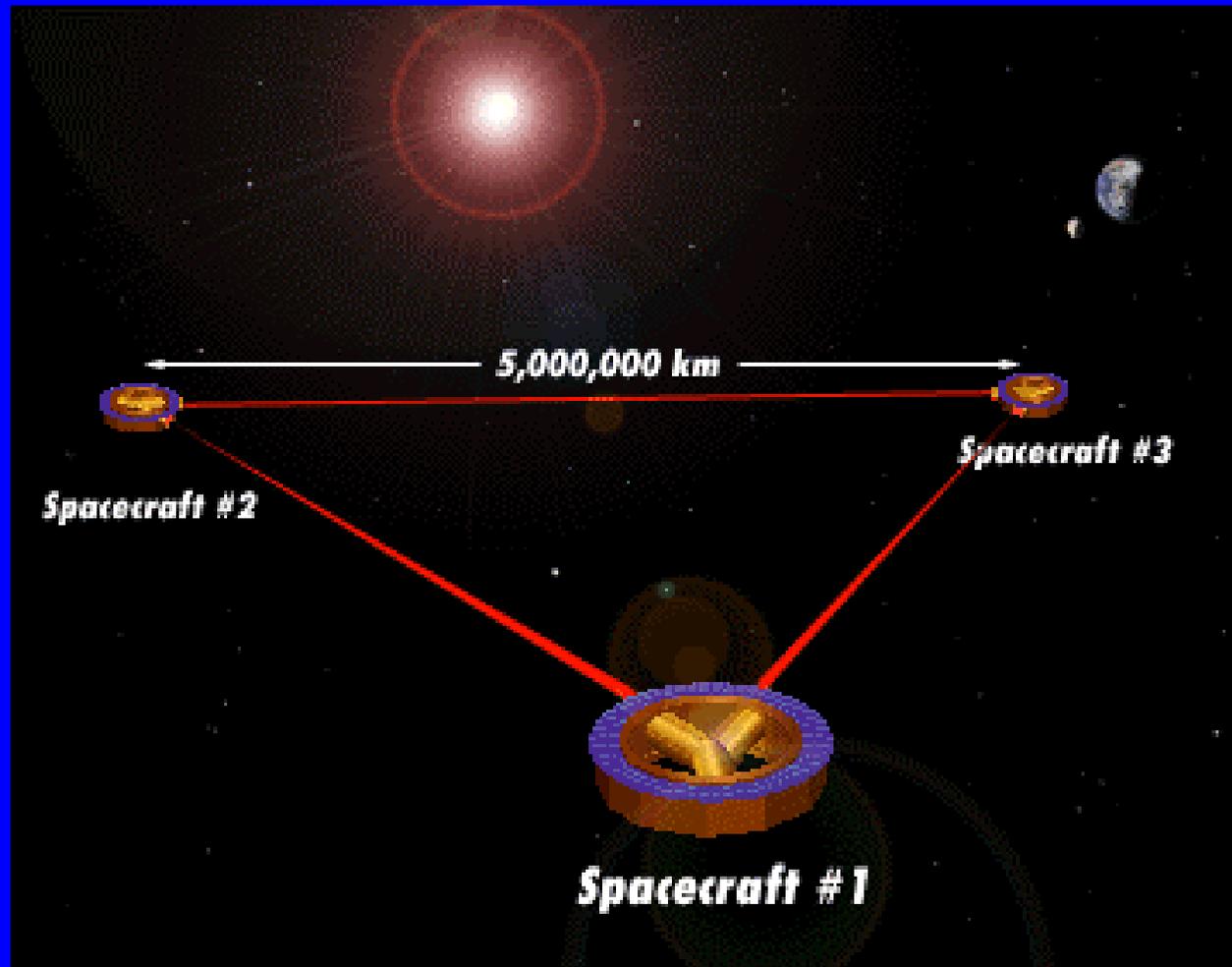
Per l'Italia sono coinvolti alcuni gruppi INFN (Padova/Trento, Perugia, Firenze/Urbino, RomaII, Napoli)

Sorgenti studiate (100 μ Hz – 0.1 Hz):

- 1) Binarie galattiche
- 1) Massive Black holes $10^5 \div 10^8 M_{\odot}$.
- 2) Stochastic background

LISA

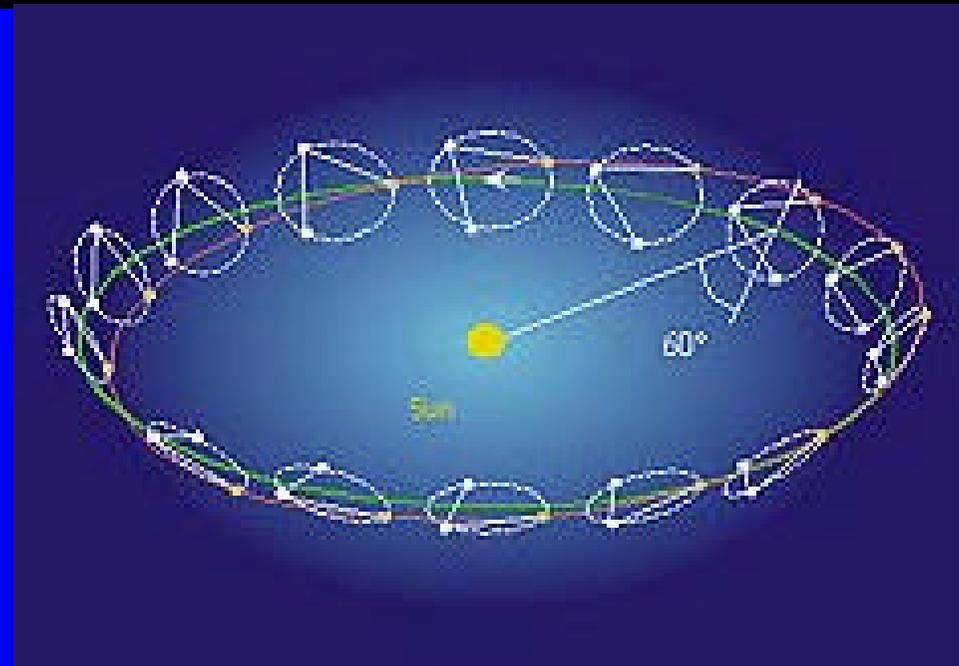
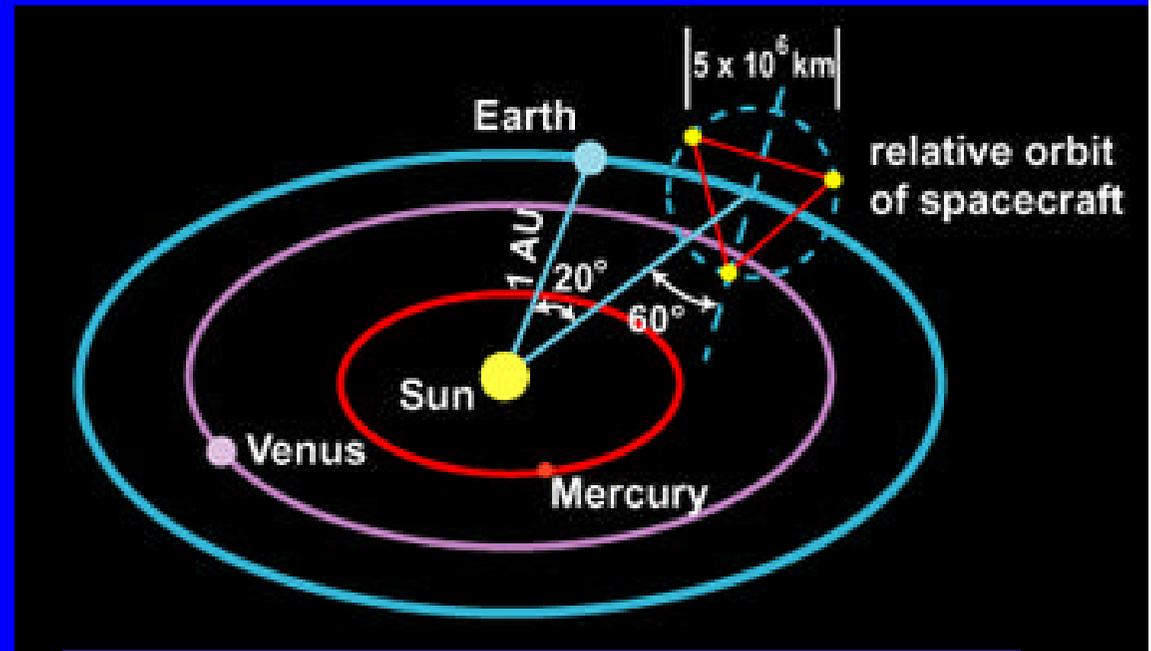
(Laser Interferometric Space Antenna)



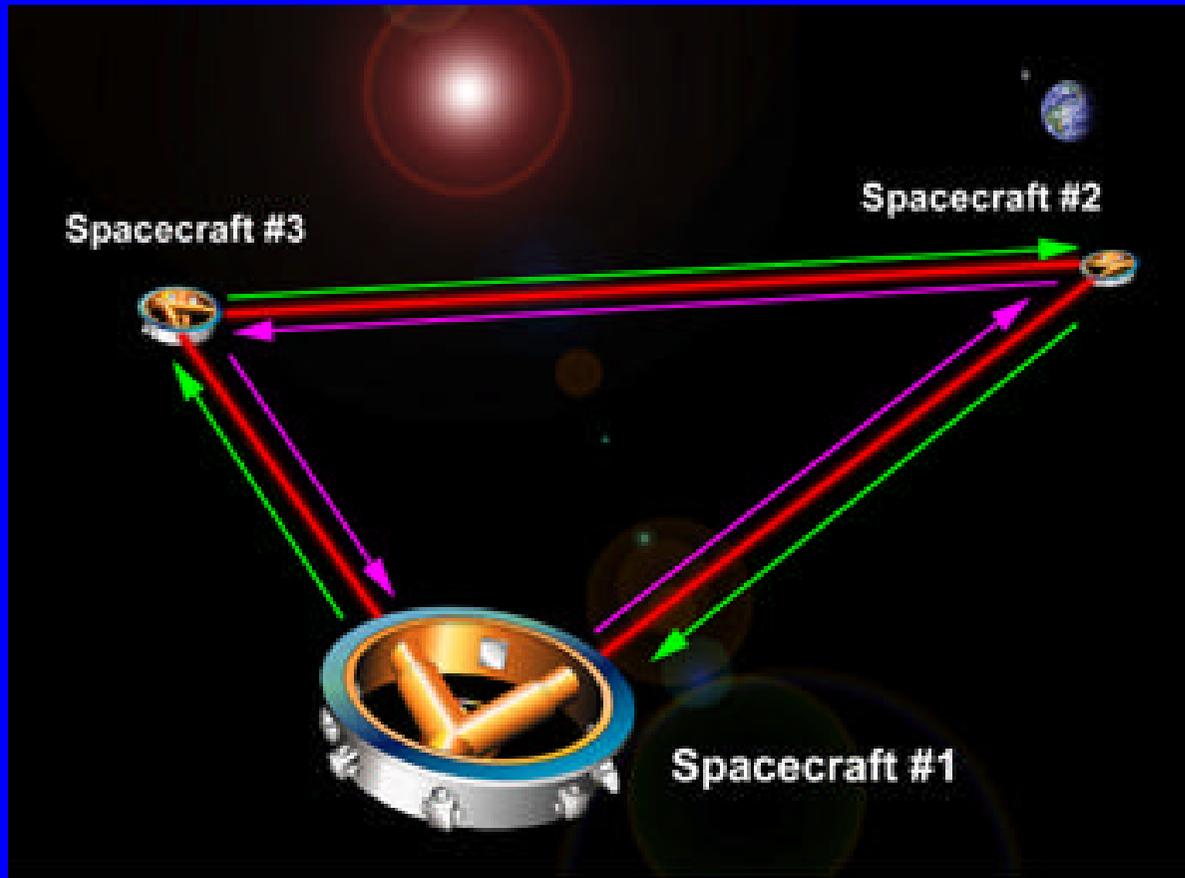
orbita di LISA

L'orbita è eliocentrica
il raggio e' quello
dell'orbita terrestre

I tre spacecraft descrivono tre
orbite indipendenti su piani
diversi in modo che le distanze
relative restino costanti
L'intera costellazione compie
un giro completo in un anno.



Principio di funzionamento

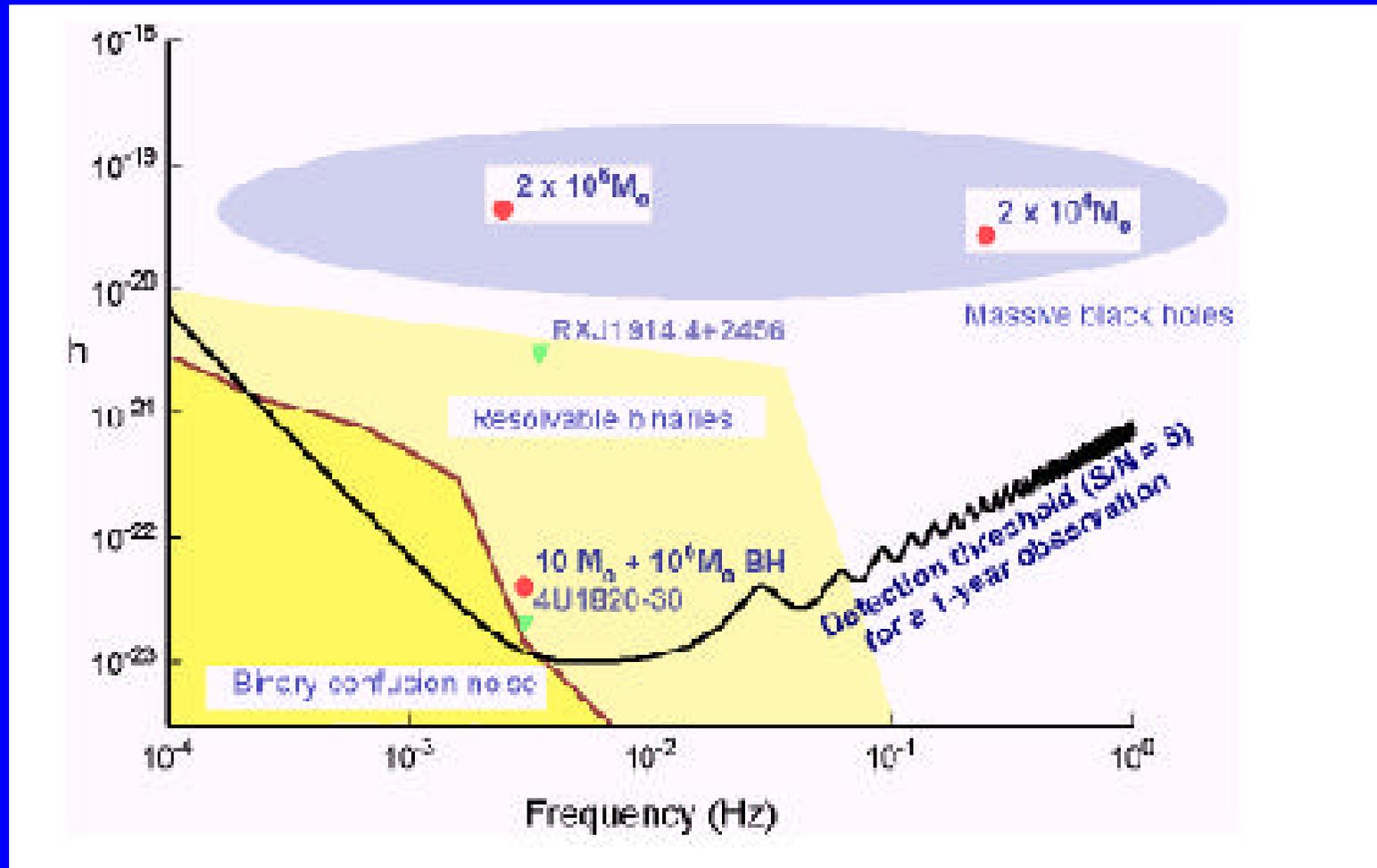


Il sistema funziona come un transponder ottico. Ogni spacecraft invia fasci laser agli altri due e riceve quelli emessi da questi e agganciati in fase con i fasci entranti. Mediante misura della fase relativa dei fasci si misurano le variazioni di percorso (dovute ad OG)

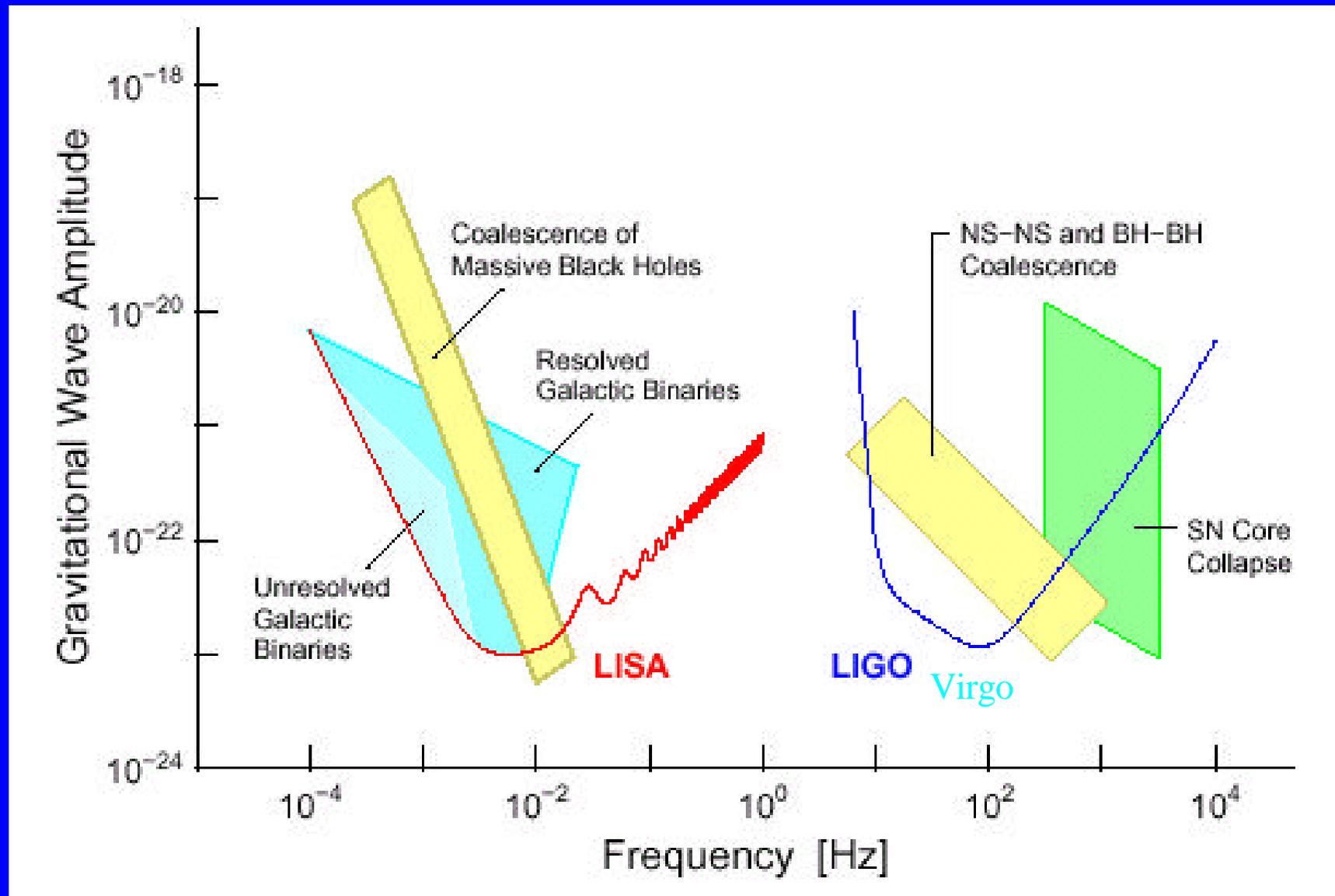
LISA sensitivity:



Se funziona LISA non può non rivelare le OG !

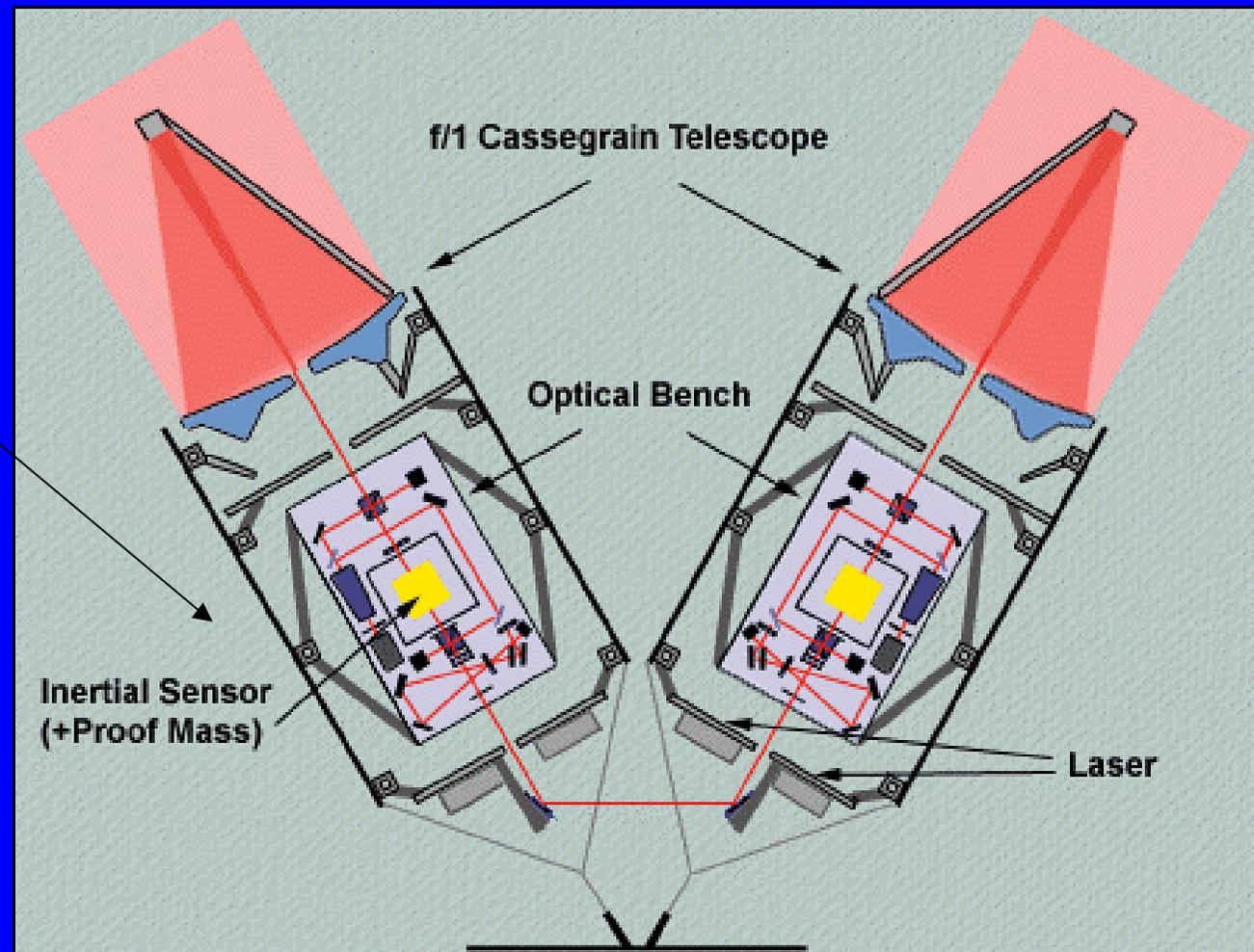


Confronto con rivelatori terrestri (Virgo-LIGO)

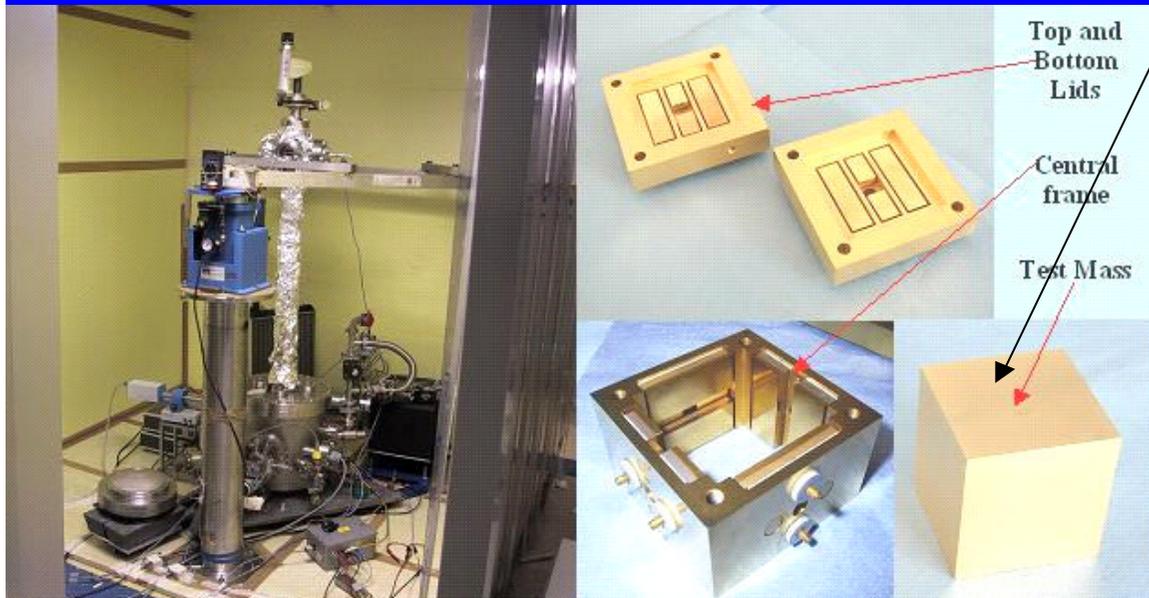
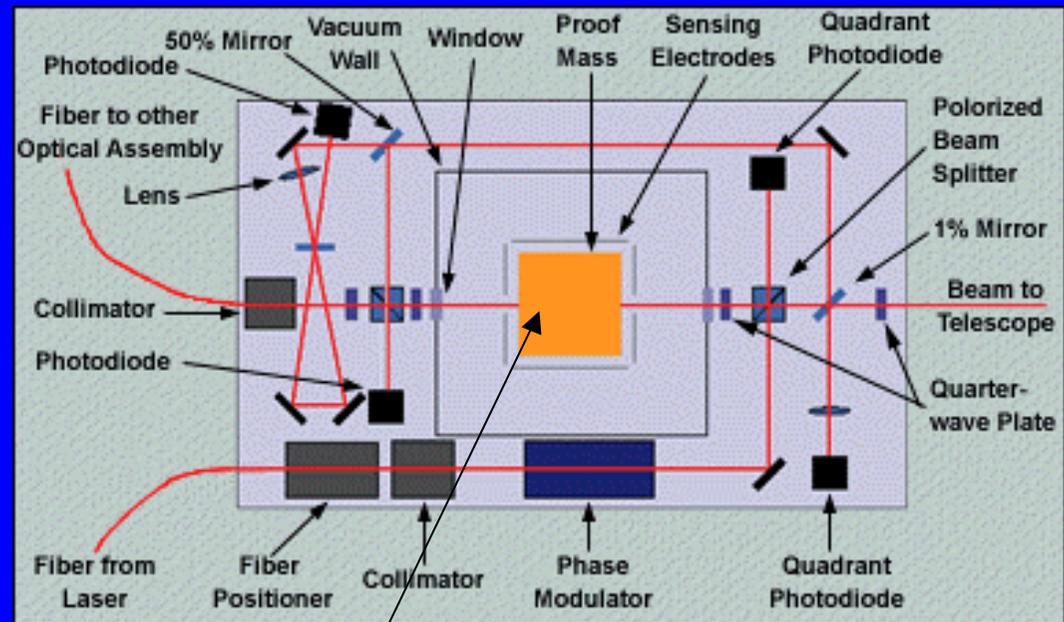


Lisa spacecraft layout

Un aspetto fondamentale e' il controllo "drag free" ottenuto mediante un "sensore inerziale"



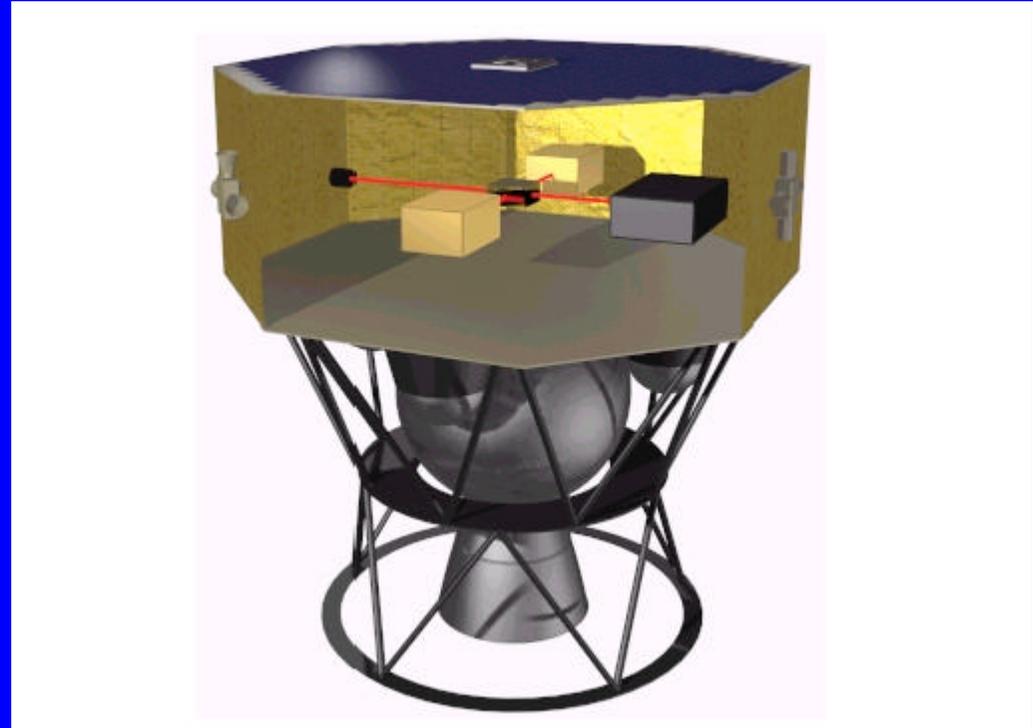
Schema del banco ottico e sensore inerziale



SMART 2 – technology demonstration mission

Lancio previsto 2008

Il payload e' costituito dal LISA Test-flight Package (LTP) dell'ESA ed il Disturbance Reduction System (RDS) della NASA, con la finalit  di testare l'interferometro e il sensore inerziale.



IMPEGNO ITALIANO IN LISA

Dal punto di vista tecnologico l'Italia ha un ruolo di leader nello sviluppo del sensore inerziale, in particolare:

- La gestione, come Principal Investigator (Vitale), dell'intero programma LTP
- Lo sviluppo del sistema di masse di test con relativa lettura di posizione e attuazione. (sviluppato dai gruppi di ricerca in collaborazione con l'industria aerospaziale nazionale che ne cura la "spazializzazione"
- Sviluppo di tecniche di test a terra per componenti dell'IS. (pendolo di torsione, sospensioni ad alto Q, facility LNGS) – Trento, Firenze/Urbino, RomaII, Perugia
- R&D su tecniche alternative per il controllo drag free (sensing ottico) - Napoli
- studio dei meccanismi di carica dovuti ai raggi cosmici – Firenze/Urbino

Il ruolo dell'INFN e le relazioni con l'ASI

- L'INFN ha finanziato fin dall'inizio lo sviluppo del prototipo di sensore inerziale e del sistema di test con pendolo di torsione (Trento)
- La partecipazione si e' recentemente allargata ad altre sezioni ed ora comprende le sezioni di Trento/Padova, Firenze/Urbino, Perugia, RomaII e Napoli.
- C'e' un accordo di programma tra ASI ed INFN per l'implementazione del programma di ricerca LISA/LISA Pathfinder, che prevede tra l'altro un piano orientativo di spesa per il periodo 2004/2006 (ASI 6.280 k€, INFN 1.400 k€).
- E' stato approvata l'implementazione presso i LNGS di una facility di test a terra per i componenti dell'IS (un pendolo a più gradi di libertà)
- Sebbene l'accordo attuale con l'ASI prevede esplicitamente solo la missione LISA-Pathfinder (2008) e' chiaro che l'interesse dell'INFN e' anche nello sviluppo della missione LISA finale (2012).

Impegno della sezione di Napoli in LISA:
(F.Acernese, E.Calloni, R.De Rosa, L.Di Fiore, L. Milano)

Sciluppo di un sistema di lettura ottico per il sensore inerziale (ad integrazione di quello capacitivo)

motivazioni:

- Risk reduction → aggiungendo ridondanza al sistema di riduce il rischio di fallimento della missione legato alla "single point failure".
- Un sistema di lettura ottico è potenzialmente più sensibile e meno affetto da back-action di quello capacitivo e presenta minori cross-couplings.

Richieste essenziali (su cui stiamo lavorando) da soddisfare:

- il sistema deve soddisfare le specifiche (occorre verifica sperimentale)
- Il sistema deve essere compatibile con il design attuale del sensore inerziale (che è già molto avanzato)

1) Lettura ottica per il sensore inerziale:

Vantaggi:

- Permette di aumentare la gap tra massa di test e satellite (diversi cm invece dei pochi mm permessi dal sensore capacitivo), riducendo gli effetti dovuti a cariche etc.
- Riduce le forze indesiderate sulla massa di test (back action) che sono essenzialmente dovute a pressione di radiazione.
- La lettura ottica di alcuni DOF potrebbe essere utile anche in presenza del sensore capacitivo

Specifiche: sensitivity $\delta x < 10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$ $10^{-4} < f < 10^{-1} \text{ Hz}$

$$\delta\theta < 5 \cdot 10^{-8} \text{ rad/Hz}^{1/2}$$

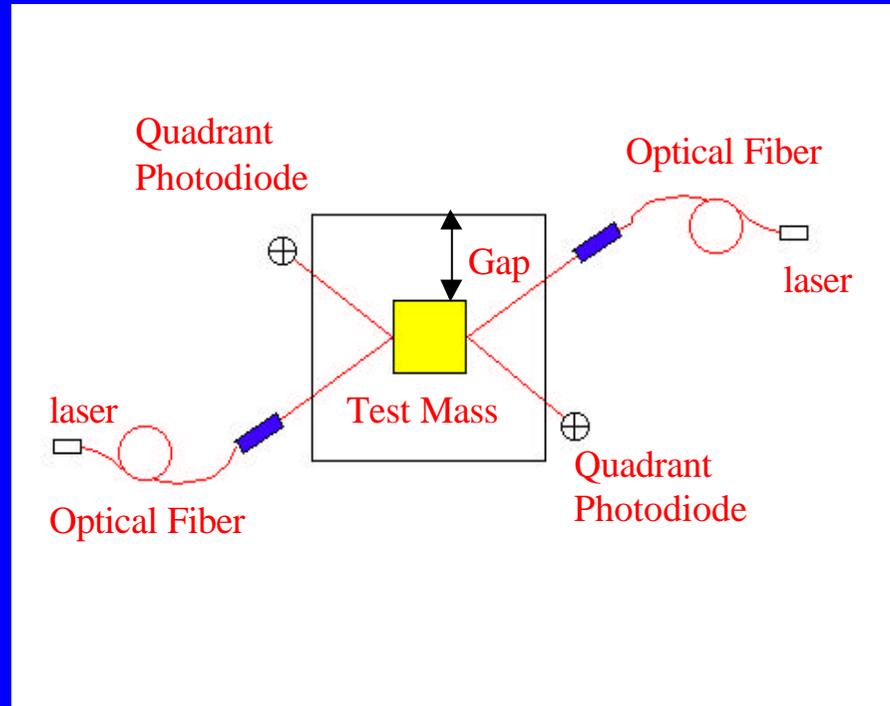
back action $\delta a \leq 10^{-15} \text{ m s}^{-2}/\text{Hz}^{1/2}$

alternative: leve ottiche + quadranti o position sensing devices (PSD)

shadow sensors

sensori interferometrici

Scelta per primi test: sensore basato su leva ottica



DIFFICOLTA' TECNOLOGICHE:

Sono legate essenzialmente alle bassissime frequenze $10^4 \div 10^{-1}$ Hz) e riguardano

- 1) Elettronica: drift, rumore etc.
- 2) Jitter angolare dei fasci ottici (mai studiato in bassa frequenza)
- 3) Fluttuazioni di potenza delle sorgenti ottiche.

Principali vantaggi: piu' semplice, economico ed affidabile di un sensore interferometrico

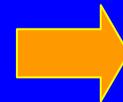
Rumori dominanti

shot noise

$$\tilde{x}_{\text{sm}} \approx 2.8 \cdot 10^{-11} \left(\frac{633\text{nm}}{\lambda} \right)^{1/2} \left(\frac{1\text{mW}}{P_0} \right)^{1/2} \left(\frac{0.78}{\eta} \right)^{1/2} \left(\frac{L}{1\text{mm}} \right) \left[\frac{\text{m}}{\sqrt{\text{Hz}}} \right]$$

power fluctuations

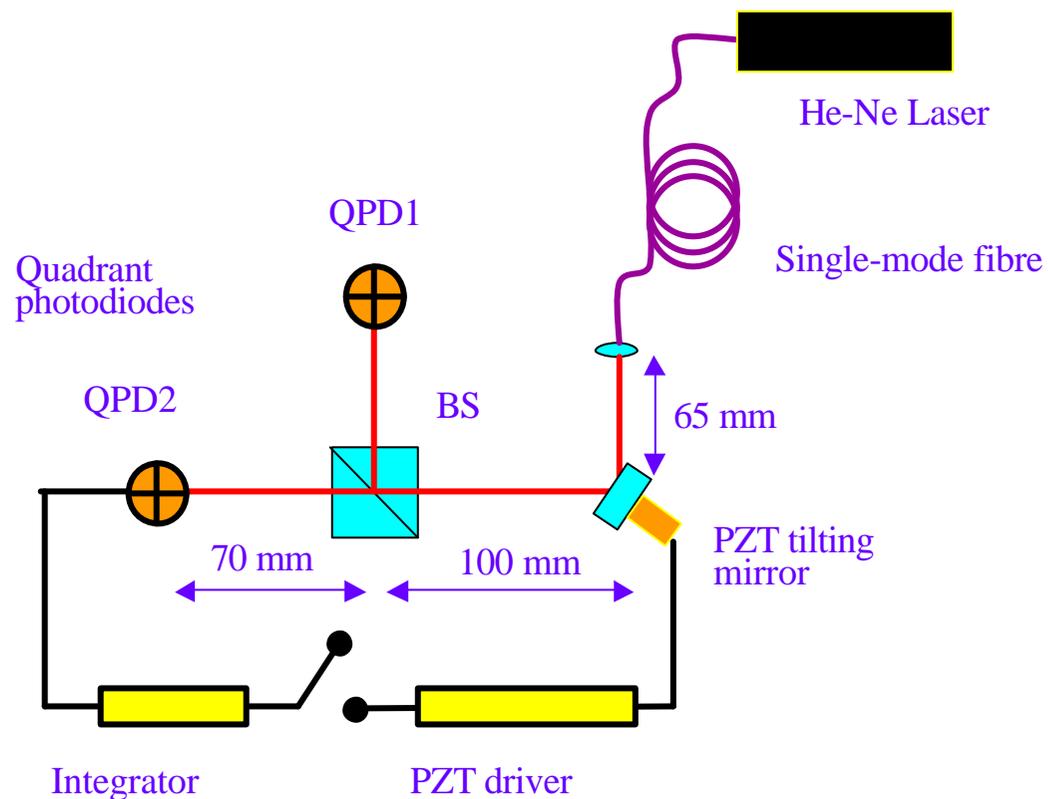
$$\tilde{F} = \frac{2 \cdot \tilde{P}}{c} \leq 6 \cdot 10^{-16} \left[\frac{\text{N}}{\sqrt{\text{Hz}}} \right]$$



$$\tilde{P} \leq 10^{-7} \left[\frac{\text{W}}{\sqrt{\text{Hz}}} \right]$$

amplifier current noise

$$\tilde{x}_I = \frac{L \cdot \tilde{I}_n(f)}{\alpha \cdot P_0} \approx 4.2 \cdot 10^{-10} \left(\frac{\tilde{I}_n(1\text{mHz})}{1.7 \cdot 10^{-10}} \right) \left(\frac{1\text{mW}}{P_0} \right) \left(\frac{1\text{mHz}}{f} \right)^{1/2} \left(\frac{L}{1\text{mm}} \right) \left[\frac{\text{m}}{\sqrt{\text{Hz}}} \right]$$



set-up on bench top

Power ⌚ 0.35 mW

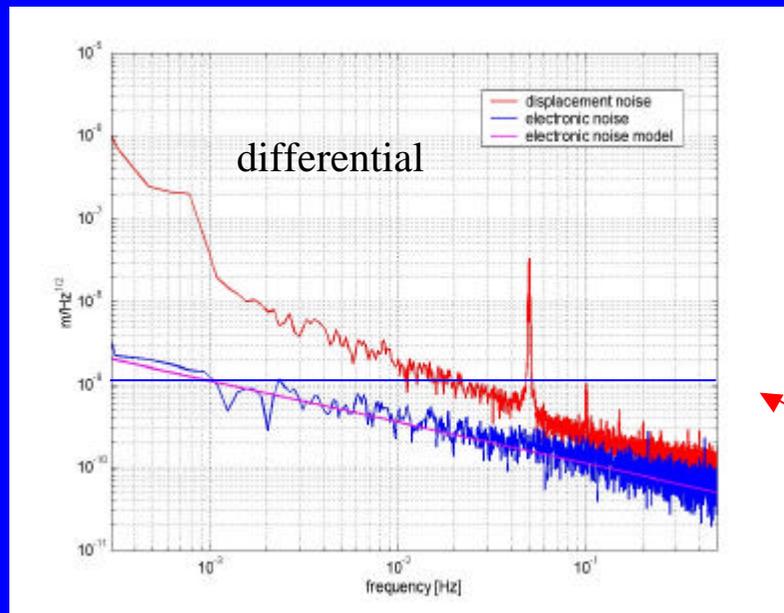
Spot size ⌚ 0.5 mm

$\lambda = 633 \text{ nm}$

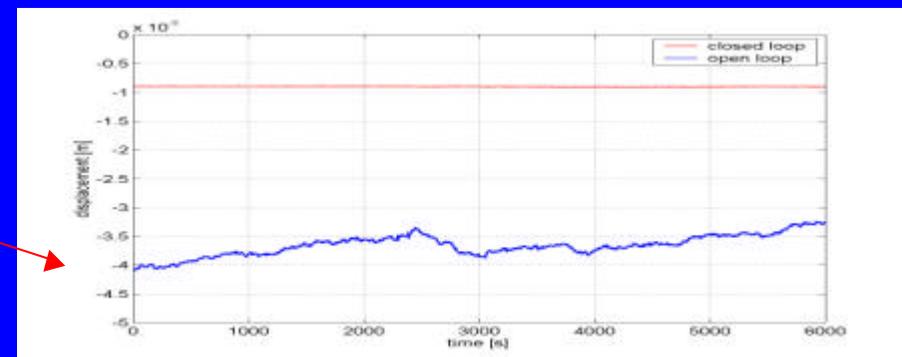
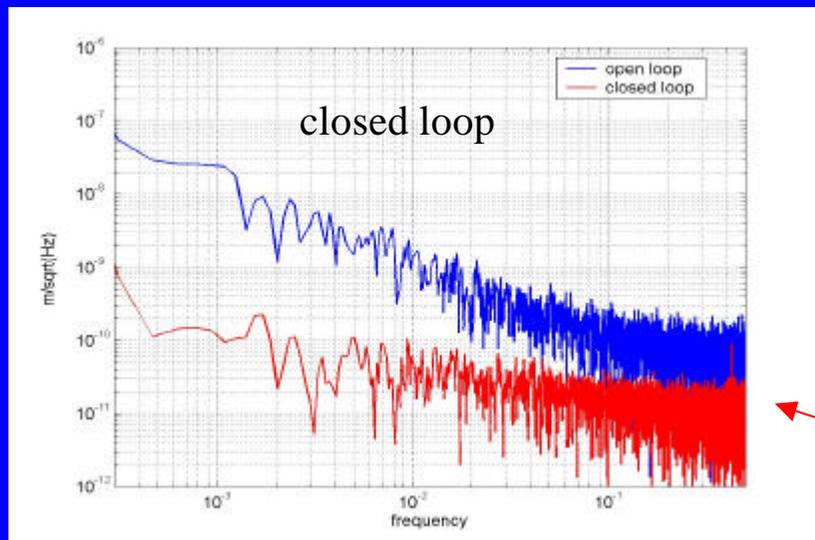
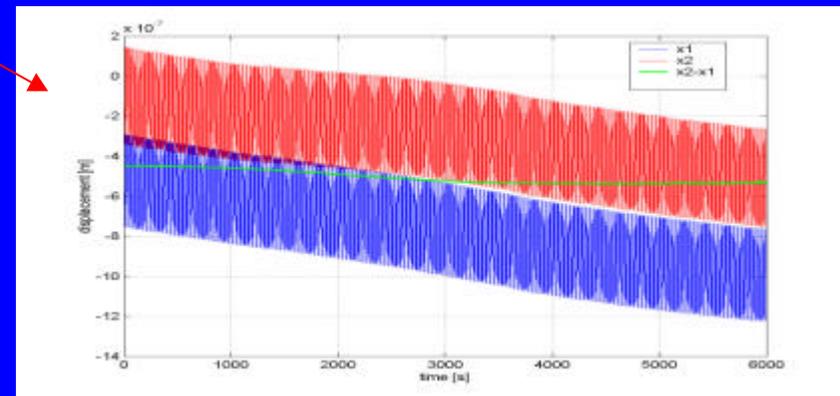
beam path = 170 mm

modi di misura:

- Misure differenziali
- Controllo beam con PZT

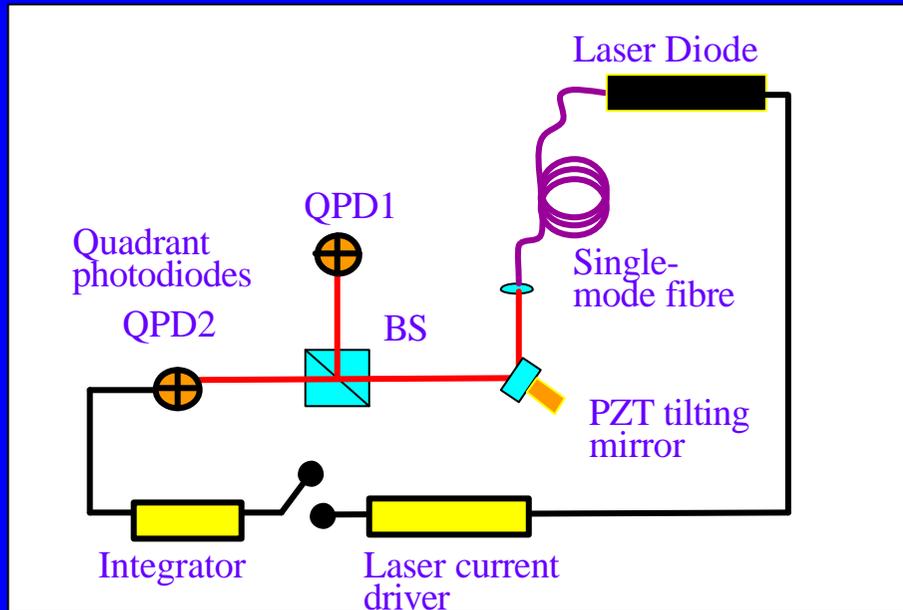


la sensibilità dimostrata è al di sotto delle specifiche ($10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$) per frequenze $> 10 \text{ mHz}$ ed un fattore 10 sopra a 1 mHz . Il rumore elettronico è entro le specifiche e in accordo con le previsioni.



Stabilizzazione in potenza del Diodo-Laser

Risultati preliminari

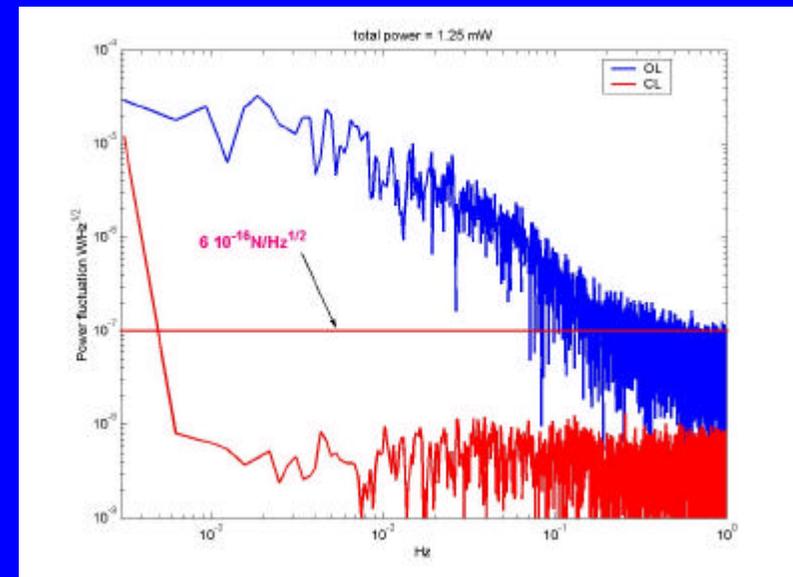


La stabilizzazione in ampiezza del laser porta il rumore dovuto alla pressione di radiazione (back-action) già oltre un fattore 10 al di sotto delle specifiche su tutta la banda.

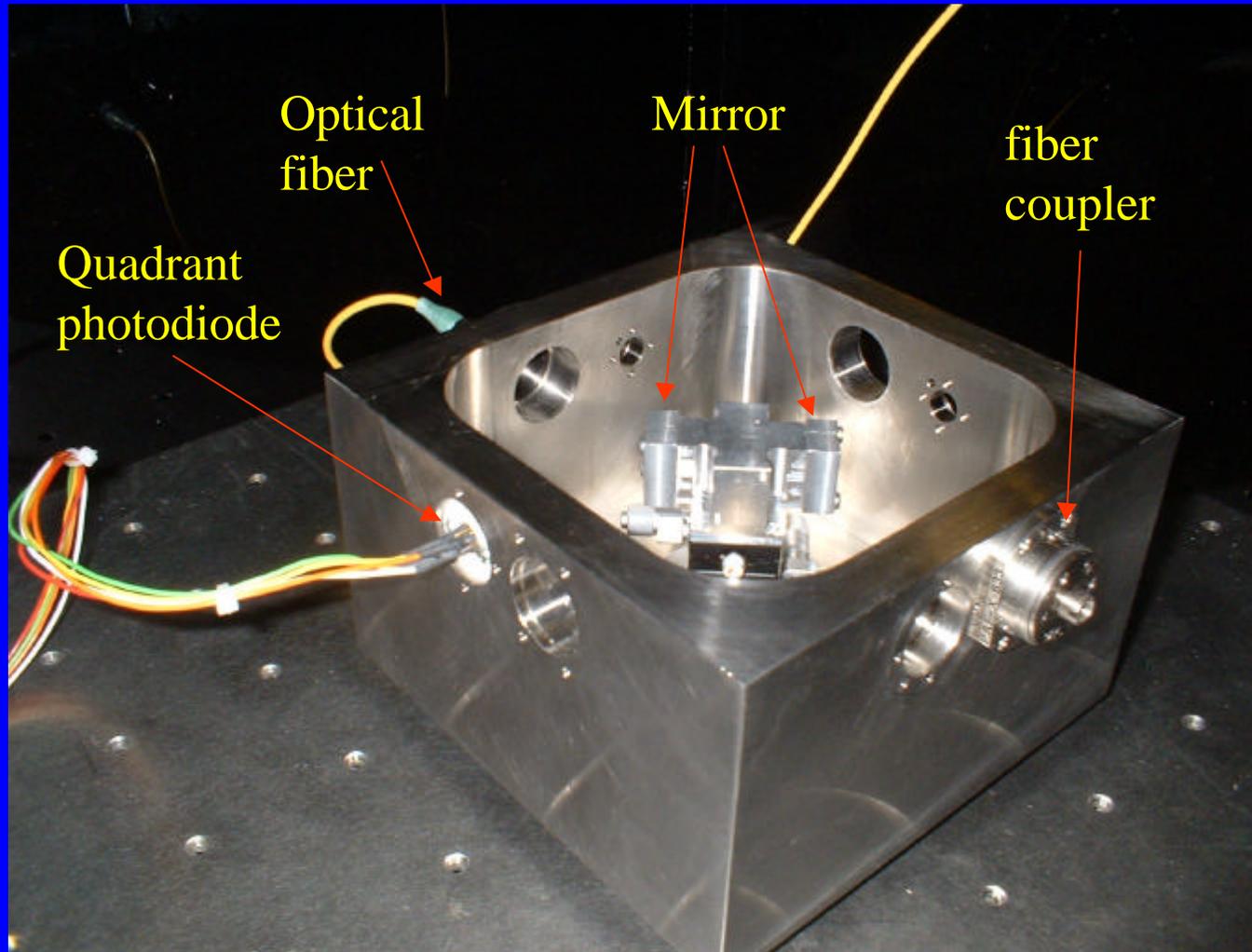
Power ⌚ 1.25 mW

$\lambda = 635 \text{ nm}$

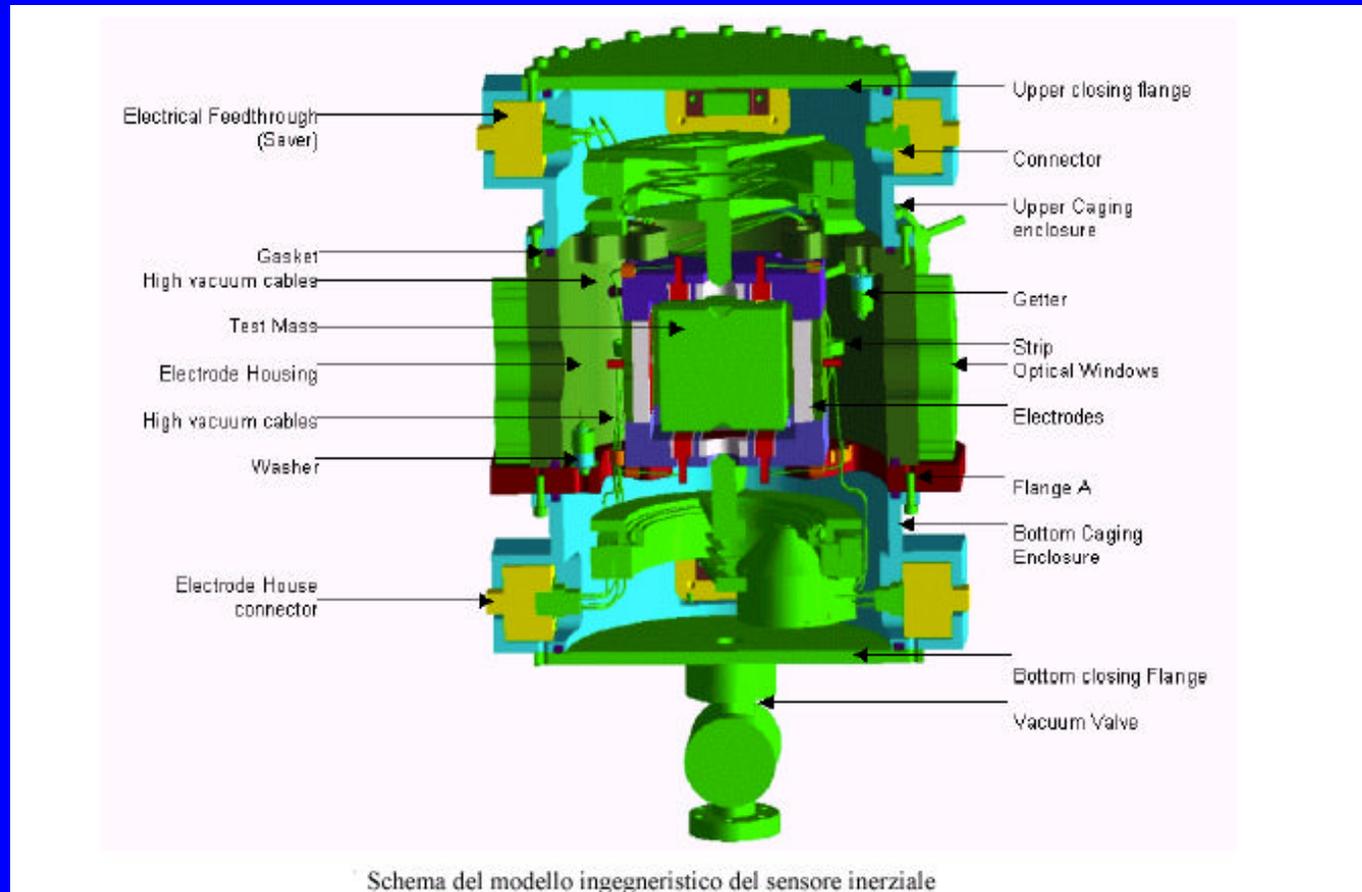
Per il momento si è usato un solo alveo del quadrante (andrà usata la somma dei quattro)



Attualmente sono in corso misure differenziali con un nuovo set-up più rigido



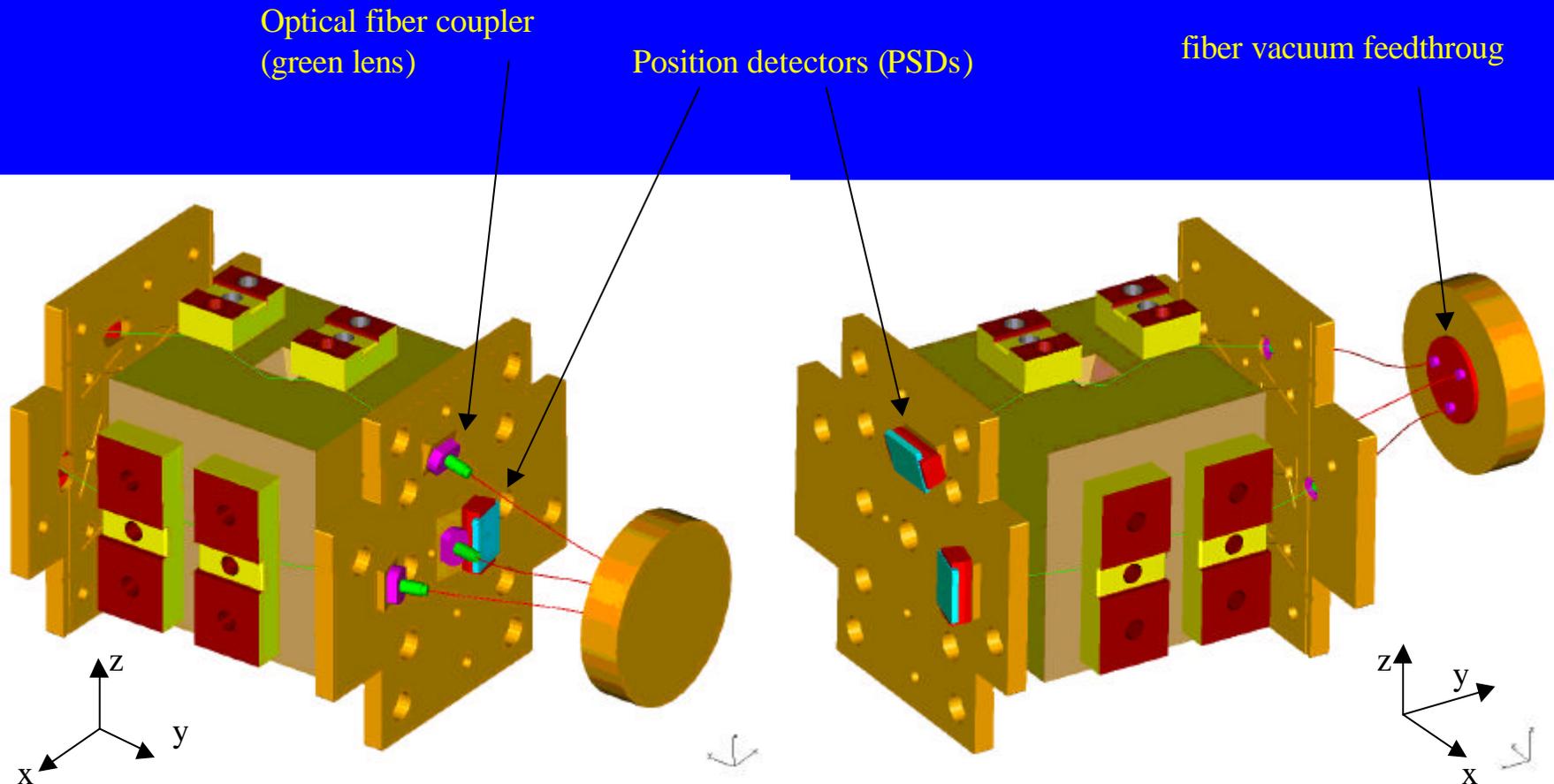
Integrazione in LISA



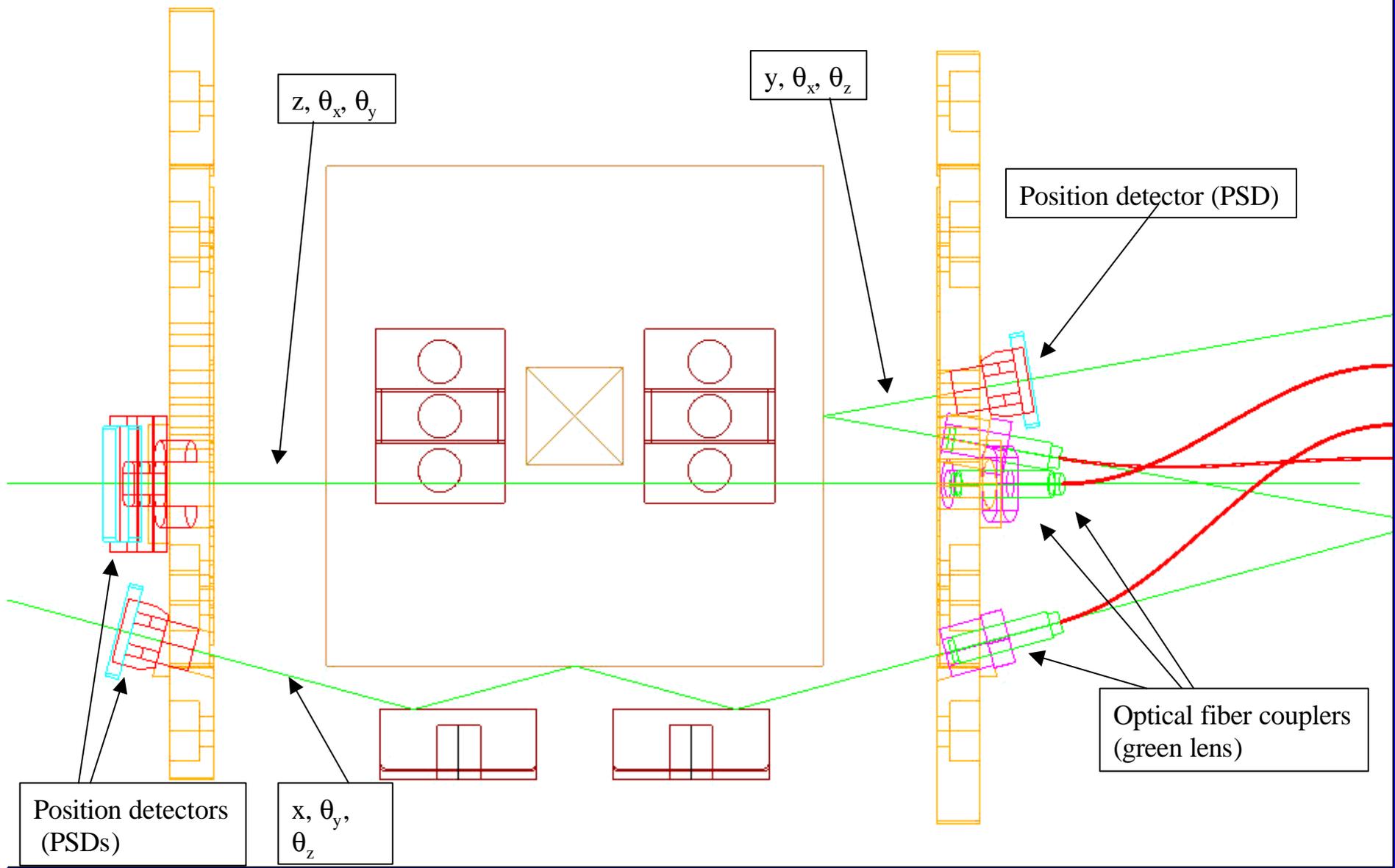
Il dispositivo ottico deve essere realizzato in modo da poter essere inserito nel sensore con modifiche minime, perché il disegno è troppo avanzato per essere modificato in maniera sostanziale

soluzione proposta: usa una delle finestre ottiche per il feedthroug delle fibre
Gli output coupler e i position sensors sono montati direttamente sull'electrode housing

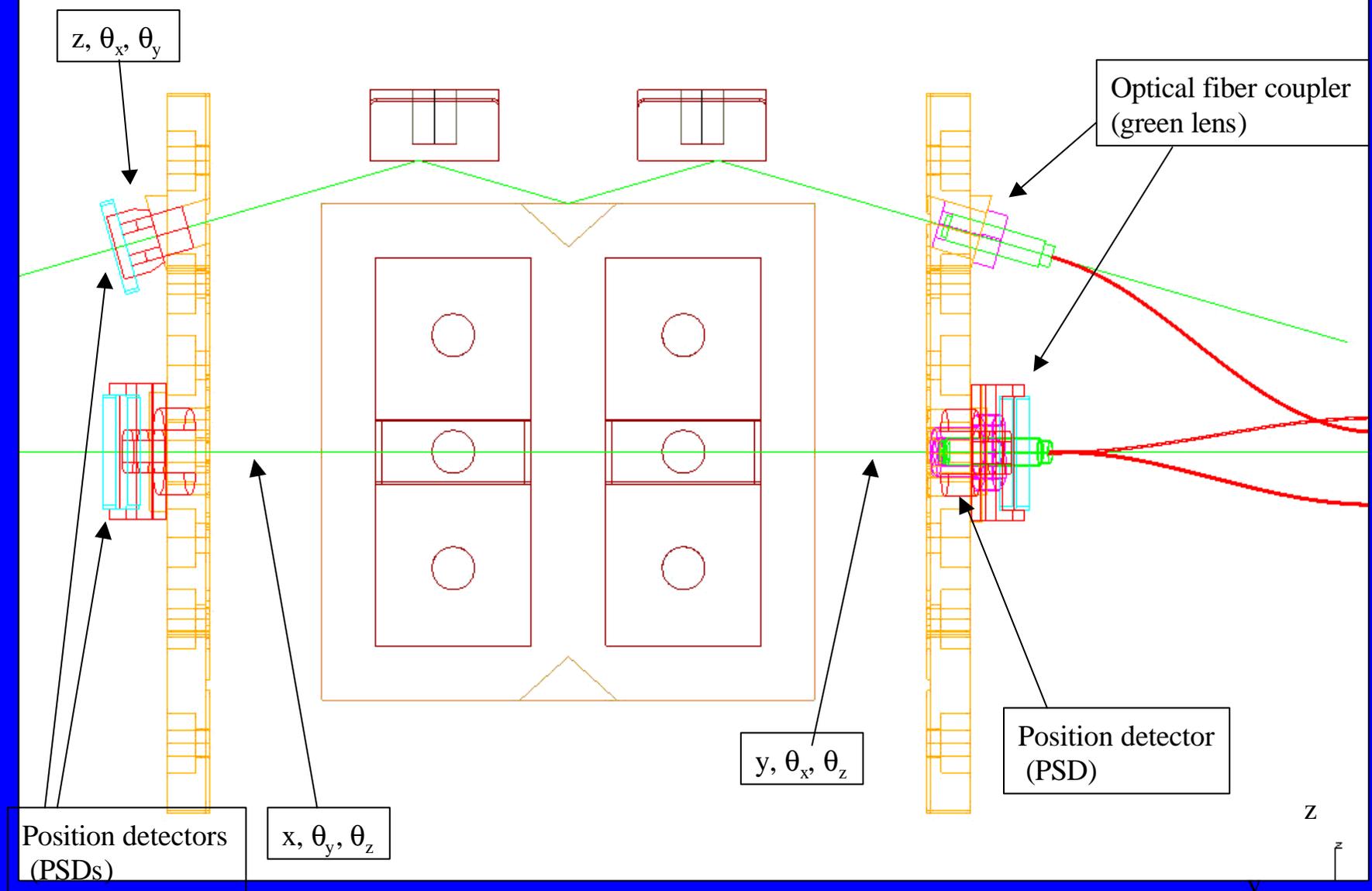
Gli elettrodi stessi sono usati come specchi per le facce x e z, per y si passa nel foro dell'elettrodo (il design e' in collaborazione col servizio progettazione meccanica della sezione)



Percorsi ottici dentro l'electrode housing – vista z



Percorsi ottici dentro l'electrode housing – vista x



Position detectors (PSDs)

x, θ_y, θ_z

y, θ_x, θ_z

Position detector (PSD)

Optical fiber coupler (green lens)

z, θ_x, θ_y

Programma di lavoro 2004-2007



2004

- Completamento dei test sulla sensibilità intrinseca del sensore ottico con set-up rigido e test e comparazione della risposta con diversi tipi di rivelatori (QPD, PSD)
- Finalizzazione del design ottico di massima (già in una fase piuttosto avanzata)
- Progetto, realizzazione e messa a punto di un prototipo di sensore ottico su più DOF

2005

- Test su pendolo di torsione del sensore ottico per caratterizzare sensibilità e back-action
- Studio degli accoppiamenti tra i diversi DOF
- Finalizzazione del design dell'interfaccia meccanica per implementarla, fin dove possibile, in LISA-Pathfinder (final design review 2005)
- Definizione delle caratteristiche del sensore finale
- Inizio design di un modello ingegneristico del sensore per LISA.

2006

- Tests sui componenti selezionati (vibrazioni, shock etc.)
- Ricerca di componenti space-qualified per il sensore ottico (laser, elettronica, sensori, fibre ottiche, passanti da vuoto etc.)
- Finalizzazione design del modello ingegneristico e sua realizzazione (pagata da ASI)
- Inizio test modello ingegneristico

2007

- Completamento dei test e finalizzazione del modello alla luce della sperimentazione precedente

Il futuro della ricerca di OG nello spazio dopo LISA

E' attualmente in fase di studio una follow-on mission per LISA.

Quest'anno e' stato approvato dalla NASA una studio preliminare per un rivelatore spaziale di OG. di seconda generazione (Big Bang Observer). Allo studio partecipano come co-investigators membri della collaborazione INFN (Vitale, Di Fiore).

L'idea di base prevede la realizzazione, sulla stessa eliocentrica di LISA, ma separati da angoli di 120° , di tre interferometri con una base però di soli 50.000 km. In questo modo la massima sensibilità si avrebbe in un intervallo di frequenze tra 100 mHz e 1 Hz, colmando il gap tra LISA e i rivelatori terrestri.

Tra le sorgenti piu' interessanti c'è, oltre ai BH di massa intermedia, il fondo stocastico di OG emesso nei primi istanti successivi al Big Bang (da cui il nome del progetto).

Il lancio potrebbe avvenire intorno al 2020.

I gruppi italiani impegnati in LISA dovrebbero continuare ad avere un ruolo chiave per le tecniche di controllo "drag-free".

In conclusione, l'attività di ricerca sulle OG nello spazio è ben consolidata in INFN (con LISA) e se ne può prevedere lo sviluppo futuro (BBO?) almeno per due decenni.